

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОУ ВПО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра древесиноведения и специальной обработки древесины

А.Г. Гороховский
О.А. Удачина
Е.Е. Шишкина

СБОРНИК ЗАДАЧ

Методические указания для практических работ
по курсу «Гидротермическая обработка древесины»
для студентов специальности 250403 «Технология деревообработки»
и направления 250300 «Технология и оборудование лесозаготовительных
и деревообрабатывающих производств»
очной и заочной форм обучения

Екатеринбург
2010

Печатается по рекомендации методической комиссии факультета МТД.
Протокол № 4 от 11 февраля 2010 г.

Рецензент – доцент кафедры ДиСОД канд. техн. наук Ю.И. Тракало

Редактор Е.А. Назаренко
Оператор Г.И. Романова

Подписано в печать 27.05.10		Плановый резерв
Плоская печать	Формат 60x84 1/16	Тираж 100 экз.
Заказ №	Печ. л. 1,86	Цена 9 руб. 32 коп.

Редакционно-издательский отдел УГЛТУ
Отдел оперативной полиграфии УГЛТУ

ПРЕДИСЛОВИЕ

Для сушильной техники особый интерес представляет способность воздуха передавать тепло высушиваемому материалу и удалять испаряемую влагу. Воздух, передающий тепло древесине и испаряющий из нее влагу, в сушильной технике называется агентом сушки. Характер процесса сушки зависит от температуры, влажности и скорости движения агента сушки. Поэтому знание свойств воздуха необходимо для управления процессом сушки.

Настоящее пособие предназначено для углубленного изучения свойств влажного воздуха как агента сушки в курсе «Гидротермическая обработка древесины». Перед решением задач на практических занятиях или при самостоятельной работе студентам надлежит изучить лекционный материал и разделы учебника П.С. Серговского и А.И. Расева «Гидротермическая обработка и консервирование древесины», касающиеся свойств обрабатывающей среды. Кроме того, в сборник включены задачи, направленные на изучение свойств древесины. В приложении даны справочные таблицы и диаграммы, необходимые при решении задач.

1. СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА КАК АГЕНТА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ

Для гидротермической обработки древесины часто используют атмосферный воздух. В воздухе всегда присутствует какое-то количество влаги в виде водяного пара. Смесь сухого воздуха с водяным паром принято называть *влажным воздухом*.

Важным параметром, характеризующим состояние влажного воздуха, является парциальное давление водяного пара. *Парциальное давление* компонента в смеси газов – это давление, которое имел бы данный компонент при удалении из объема, занимаемого смесью всех остальных газов.

Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе не может быть больше давления насыщения при данной температуре, т.е. $p_n \leq p_n$.

Воздух, который содержит насыщенный водяной пар ($p_n = p_n$), называют насыщенным паром воздухом. Воздух, для которого выполняется неравенство $p_n < p_n$, называется ненасыщенным.

Для оценки количества влаги, присутствующей в воздухе, используют следующие параметры: относительную влажность и влагосодержание.

Относительная влажность воздуха ϕ – это отношение парциального давления водяного пара, содержащегося во влажном воздухе к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре.

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n} . \quad (1)$$

Величину относительной влажности часто выражают в процентах. Поскольку $0 \leq p_n \leq p_n$, то $0 \leq \varphi \leq 100 \%$. Для сухого воздуха $\varphi = 0 \%$, для воздуха, насыщенного водяным паром, $\varphi = 100 \%$.

Влагосодержанием называют отношение массы пара, содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха. Величину влагосодержания выражают в граммах влаги на 1 кг сухого воздуха.

Влагосодержание d , г/кг, определяется по формуле

$$d = 622 \frac{p_n}{p_a - p_n}, \quad (2)$$

где p_a – атмосферное давление, равное 100 000 Па.

Из уравнения (2) следует, что парциальное давление водяного пара, Па, во влажном воздухе равно

$$p_n = \frac{p_a d}{622 + d}. \quad (3)$$

Плотность влажного воздуха представляет собой общую массу воздуха и водяного пара в единице объема. При необходимости рассчитать плотность влажного воздуха ρ , кг/м³, пользуются формулой

$$\rho = \frac{349 - 132 \frac{d}{622 + d}}{273 + t}.$$

Приведенный удельный объем влажного воздуха, м³, т.е. объем занимаемый 1 кг смеси воздуха и водяного пара, представляет собой величину, обратную ρ .

$$V = 4,62 \cdot 10^{-6} \cdot T(622 + d), \\ T = t + 273,$$

где T – термодинамическая температура, К.

Отсюда следует, что с увеличением парциального давления пара, т.е. с увеличением влажности воздуха, плотность его уменьшается. Поэтому влажный воздух всегда легче, чем сухой.

Количество тепла, содержащееся в 1 кг воздуха, называется теплосодержанием воздуха, или энтальпией, I , кДж/кг.

Теплосодержание I , кДж/кг, определяется по формуле

$$I = t + 0,001d(1,93t + 2490), \quad (4)$$

где t – температура воздуха, °С.

Задача 1

Определить расчетным путем неизвестные параметры влажного воздуха (I , d , t , $P_{п0}$, φ) до и после процесса нагревания, если дано:

Таблица 1

№ вари- анта	I_0 , кДж/кг	d_0 , г/кг	$P_{п0}$, Па	t_0 , °C	φ_0	Нагревание до	
						t_1 , °C	φ_1
1	1300	-	-	80	-	98	-
2	-	-	25000	67	-	93	-
3	-	205	-	-	0,85	-	0,28
4	-	-	-	53	0,75	104	-
5	500	-	-	65	-	82	-
6	580	185	-	-	1,0	98	-
7	-	-	19000	-	0,9	85	-
8	-	52	-	42	-	79	-
9	610	-	-	70	-	92	-
10	820	-	-	75	-	89	-
11	-	145	-	60	-	70	-
12	-	-	-	50	0,8	60	-
13	-	100	-	-	0,5	-	0,3
14	-	-	10000	50	-	80	-
15	-	-	8000	42	-	-	0,75
16	-	45	-	40	-	65	-
17	-	-	-	55	1,0	90	-
18	-	-	3500	30	-	-	0,45
19	-	150	-	-	0,8	-	0,35
20	-	85	-	50	-	78	-
21	-	25	-	30	-	70	-
22	-	-	3500	30	-	75	-
23	-	-	-	28	0,65	80	-
24	-	-	9500	58	-	-	0,38
25	-	120	-	60	-	95	-
26	-	120	-	-	0,88	-	0,3
27	-	-	5300	46	-	-	0,2
28	-	59	-	48	-	90	-
29	-	200	-	-	0,98	-	0,45
30	-	-	-	43	0,65	64	-

Задача 2

Воздух с температурой t_1 и степенью насыщенности ϕ_1 в процессе сушки охладился до температуры t_2 . Определить влагосодержание d_2 и степень насыщенности ϕ_2 в результате этого процесса. Определить, сколько влаги испарили в себя M кг воздуха.

Таблица 2

№ варианта	t_1	ϕ_1	t_2	M
1	60	0,5	50	80
2	65	0,65	55	90
3	63	0,4	48	85
4	70	0,5	60	83
5	55	0,7	50	58
6	63	0,25	50	100
7	80	0,75	75	90
8	75	0,63	64	105
9	78	0,8	65	200
10	90	0,4	50	92
11	85	0,6	40	89
12	73	0,52	60	130
13	75	0,61	50	140
14	80	0,54	64	98
15	85	0,9	61	103
16	69	0,83	60	94
17	58	0,47	49	69
18	67	0,65	62	205
19	92	0,3	87	187
20	57	0,6	53	93
21	61	0,74	55	145
22	77	0,63	70	167
23	83	0,38	75	91
24	88	0,82	82	108
25	94	0,53	86	69
26	52	0,57	47	128
27	59	0,46	55	107
28	70	0,7	64	95
29	65	0,51	61	94
30	78	0,59	76	100

Задача 3

Воздух, имеющий температуру t_1 и степень насыщенности φ_1 , в количестве M_1 кг, смешали с M_2 кг другого воздуха, имеющего температуру t_2 и степень насыщенности φ_2 . Определить параметры ($I_{см}$, $d_{см}$, $t_{см}$, $\varphi_{см}$) полученной смеси.

Таблица 3

№ варианта	Параметры первого компонента			Параметры второго компонента		
	t_1	φ_1	M_1	t_2	φ_2	M_2
1	60	0,8	80	30	0,6	10
2	75	0,63	105	35	0,63	15
3	78	0,8	200	40	0,55	40
4	90	0,4	92	60	0,3	23
5	85	0,6	89	25	0,45	9
6	73	0,52	130	36	0,36	12
7	75	0,61	140	29	0,5	16
8	80	0,54	98	19	0,4	5
9	85	0,9	103	24	0,61	25
10	69	0,83	94	41	0,39	6
11	58	0,47	69	23	0,7	10
12	67	0,65	205	26	0,6	26
13	92	0,3	187	29	0,58	30
14	57	0,6	93	17	0,54	31
15	61	0,74	145	28	0,67	18
16	77	0,63	167	32	0,62	34
17	83	0,38	91	34	0,56	21
18	88	0,82	108	27	0,34	15
19	94	0,53	69	32	0,62	23
20	52	0,57	128	35	0,67	24
21	59	0,46	107	29	0,58	28
22	70	0,7	95	25	0,85	29
23	65	0,51	94	34	0,59	33
24	78	0,59	100	36	0,46	22
25	60	0,5	90	39	0,43	17
26	65	0,65	85	31	0,81	11
27	63	0,4	83	26	0,63	9
28	70	0,5	58	37	0,51	8
29	55	0,7	100	16	0,57	28
30	63	0,25	89	19	0,54	24

Задача 4

В сушильную камеру с многократной циркуляцией из атмосферы поступает M_0 воздуха с температурой t_0 и влагосодержанием d_0 . Он смешивается с M_1 отработавшего сушильного агента, температура которого t_1 и относительная влажность φ_1 . Определить температуру и относительную влажность сушильного агента, поступающего в сушильное пространство. Каким будет удельный расход теплоты на испарение влаги?

Таблица 4

№ варианта	M_0 , кг/с	t_0 , °C	d_0 , г/кг	M_1 , кг/с	t_1 , °C	φ_1
1	12	34	25	93	61	0,3
2	16	36	10	145	77	0,6
3	5	39	28	167	83	0,74
4	25	31	24	91	88	0,63
5	14	26	20	108	94	0,38
6	10	37	21	69	52	0,82
7	26	16	11	128	59	0,53
8	6	19	12	107	70	0,57
9	31	35	26	95	65	0,46
10	18	40	30	94	78	0,7
11	4	60	56	100	60	0,51
12	21	25	16	90	65	0,59
13	10	36	30	99	63	0,5
14	15	29	18	108	70	0,65
15	40	19	12	69	55	0,4
16	23	24	16	128	63	0,5
17	9	41	22	107	60	0,7
18	12	23	14	95	75	0,25
19	16	26	13	94	78	0,8
20	5	29	18	100	90	0,63
21	25	23	10	90	85	0,8
22	6	26	12	85	73	0,4
23	10	29	16	83	75	0,6
24	26	17	15	58	80	0,52
25	5	28	19	100	85	0,61
26	31	32	20	89	69	0,54
27	8	34	21	116	58	0,9
28	11	27	17	157	67	0,83
29	3	32	19	96	92	0,47
30	7	35	20	117	57	0,65

2. Id – ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Определить параметры влажного воздуха можно графически, пользуясь Id-диаграммой. Она позволяет экономить время при выполнении инженерных расчетов, а также очень удобна при анализе процессов изменения состояния воздуха.

Кривая линия постоянной относительной влажности $\phi = 1$ делит Id-диаграмму на две части. Верхняя область диаграммы (выше линии $\phi = 1$) характеризует состояние ненасыщенного воздуха и занимает большую часть ее площади. Нижняя часть диаграммы, расположенная под линией $\phi = 1$, называется зоной тумана. Такое состояние воздуха говорит о том, что он полностью насыщен и происходит процесс конденсации пара.

Кроме линий относительной влажности воздуха ϕ , на Id-диаграмму нанесены следующие семейства линий: изотермы $t = \text{const}$, характеризующие температуру воздуха; линии теплосодержания (энтальпии) $I = \text{const}$ расположены под углом 171°C к вертикали; вертикальные линии влагосодержания $d = \text{const}$, с которыми совпадают линии постоянного парциального давления водяного пара $P_{\text{п}} = \text{const}$; семейства прямых с постоянными значениями плотности воздуха $\rho = \text{const}$ и приведенного удельного объема $V = \text{const}$.

Каждой точке на Id-диаграмме соответствует определенное состояние влажного воздуха. Чтобы найти нужную точку, надо знать, как минимум, два параметра воздуха, после чего остальные параметры легко определяются. На рис. 1 показано, как для состояния воздуха, характеризуемого точкой А, находят значения температуры, энтальпии, влагосодержания и парциального давления водяного пара. Величину относительной влажности, плотности и приведенного удельного объема определяют в зависимости от расположения точки А относительно двух смежных линий $\phi = \text{const}$, $\rho = \text{const}$ и $V = \text{const}$.

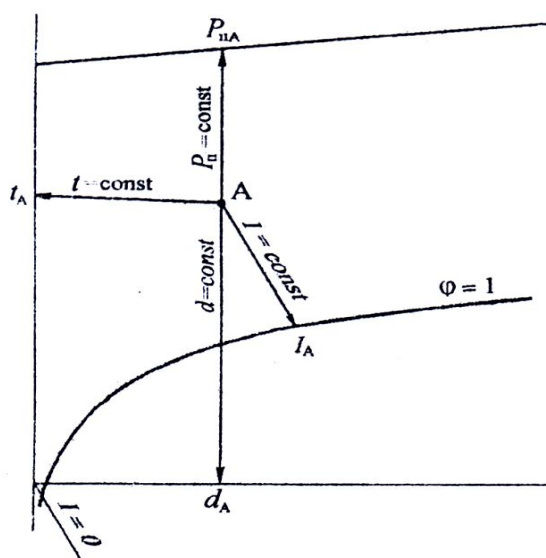


Рис. 1. Определение параметров влажного воздуха с помощью Id-диаграммы

2.1. Процессы изменения состояния воздуха во время сушки

Гидротермическая обработка древесины сопровождается, как правило, изменением параметров обрабатывающих агентов. Наиболее характерными процессами изменения состояния воздуха являются нагревание и охлаждение, испарение влаги с поверхности древесины, смешивание воздуха различных состояний.

Нагревание или **охлаждение** воздуха при контакте с горячей или холодной сухой поверхностью происходит без изменения его влагосодержания ($d = \text{const}$). Остается постоянным и парциальное давление водяного пара. При нагревании температура и энтальпия воздуха возрастают, а относительная влажность и плотность уменьшаются. Охлаждение воздуха сопровождается обратным изменением этих параметров. На Id -диаграмме процессы нагревания и охлаждения воздуха отображаются линиями $d = \text{const}$. На рис. 2 отрезок 1-2 показывает процесс нагревания воздуха от состояния 1 до состояния 2, а отрезок 1-3 – охлаждение исходного воздуха до состояния 3. Если продолжать охлаждение, то воздух может достичь состояния насыщения ($\varphi = 1$), которому на рис. 2 соответствует точка 4. Температура, при которой это произойдет, называется **температурой точки росы** $t_{\text{тр}}$.

Дальнейшее охлаждение воздуха, насыщенного паром, будет сопровождаться конденсацией из него воды, что приводит к уменьшению влагосодержания при постоянном значении относительной влажности $\varphi = 1 = \text{const}$ (отрезок 4-5).

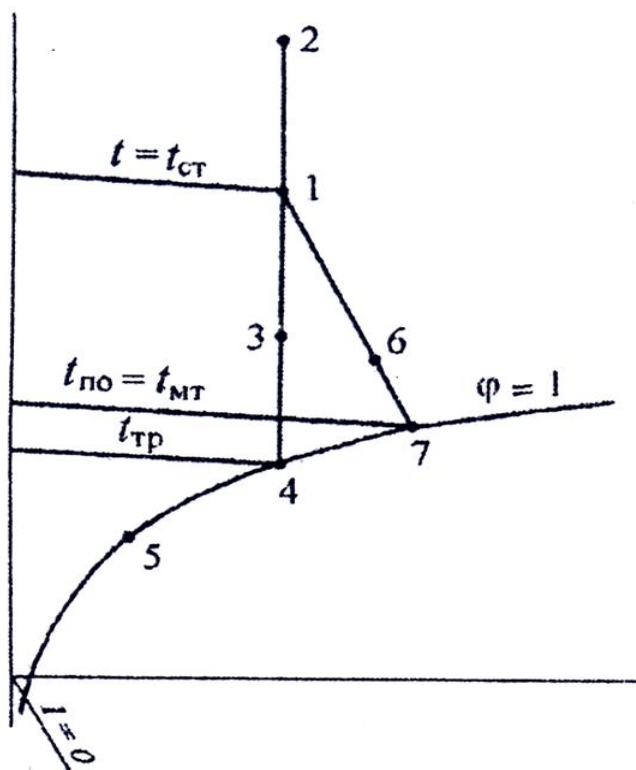


Рис. 2. Изображение на Id -диаграмме процессов нагревания, охлаждения и испарения воды

Испарение влаги в воздух происходит, если он не насыщен паром и контактирует с поверхностью воды или влажного тела. Энтальпия (теплосодержание) воздуха при протекании этого процесса остается неизменной, так как энергия, затрачиваемая на испарение, остается в воздухе в виде скрытой теплоты парообразования. Происходящее изменение состояния воздуха изображается на Id-диаграмме (рис. 2) отрезком 1-6 прямой линии $I = \text{const}$. Температура воздуха при испарении воды понижается, а влагосодержание, относительная влажность и плотность возрастают. Если процесс испарения воды в воздух продолжается достаточно долго, то воздух может стать насыщенным водяным паром. Температура, при которой воздух, испаряя влагу, достигает состояния насыщения, называется **температурой предела охлаждения** $t_{\text{по}}$. Температура предела охлаждения может быть непосредственно измерена смоченным термометром – термометром, шарик которого обернут смачиваемой водой тканью. Смоченный термометр в совокупности с обычным (сухим) образует прибор, который называется психрометром. По показаниям сухого ($t_{\text{ст}} = t$) и смоченного ($t_{\text{мт}} = t_{\text{по}}$) термометров психрометра, используя Id-диаграмму, легко определить все параметры воздуха. Для этого находят точку пересечения изотермы $t_{\text{мт}} = \text{const}$ с линией $\phi = 1$ (точка 7 на рис. 2). От этой точки проводят линию $I = \text{const}$ до ее пересечения с изотермой $t_{\text{ст}} = \text{const}$. Полученная при этом точка 1 и будет характеризовать искомое состояние воздуха.

При смешивании воздуха двух разных состояний образуется смесь, параметры которой зависят от состояния и количества смешиваемых компонентов. Отношение массы воздуха состояния 1 M_1 к массе воздуха состояния 2 M_2 называется коэффициентом пропорции смеси:

$$n = \frac{M_1}{M_2}. \quad (5)$$

Для вычисления параметров смеси составляют уравнения баланса тепла и влаги. Очевидно, на 1 кг воздуха в состоянии 2 приходится n кг воздуха в состоянии 1. Поэтому

$$I_2 + nI_1 = (1 + n)I_{\text{см}}, \quad (6)$$

$$d_2 + nd_1 = (1 + n)d_{\text{см}}. \quad (7)$$

Из этих выражений непосредственно определяют параметры смеси:

$$I_{\text{см}} = \frac{I_2 + nI_1}{1 + n}, \quad (8)$$

$$d_{\text{см}} = \frac{d_2 + nd_1}{1 + n}, \quad (9)$$

где I_1, I_2 – энтальпия воздуха состояний 1 и 2, кДж/кг;

d_1, d_2 – влагосодержание воздуха состояний 1 и 2, г/кг.

Из уравнений (8) и (9) в результате преобразований получаются выражения для расчета коэффициента пропорции смеси:

$$n = \frac{d_2 - d_{cm}}{d_{cm} - d_1} = \frac{I_2 - I_{cm}}{I_{cm} - I_1}. \quad (10)$$

Процесс смешивания воздуха двух состояний может быть проиллюстрирован с помощью Id-диаграммы (рис. 3). Точка 3, характеризующая состояние смеси, всегда находится на прямой, соединяющей точки 1 и 2, которые соответствуют состоянию смешиваемых компонентов. При этом она располагается ближе к точке, характеризующей состояние преобладающего в смеси компонента.

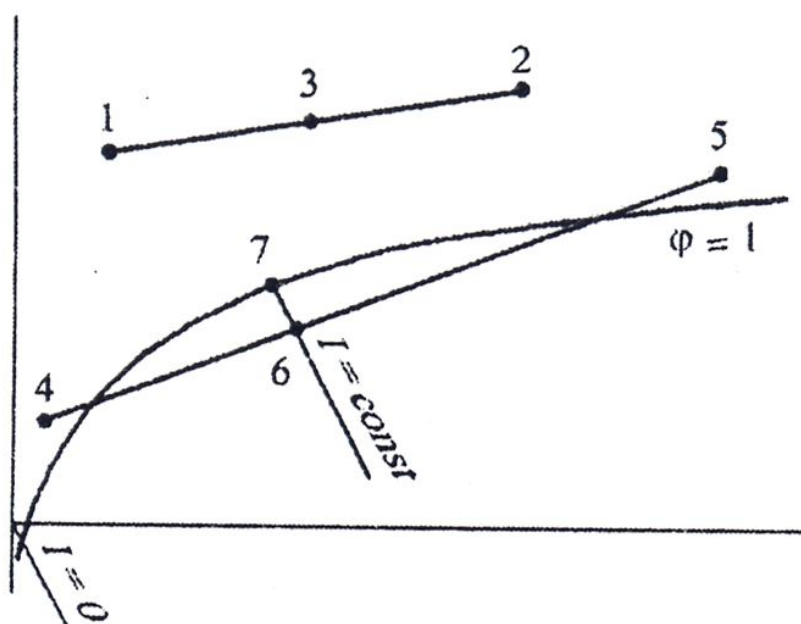


Рис. 3. Изображение на Id-диаграмме процесса смешивания воздуха двух состояний

При смешивании может возникнуть ситуация, когда ненасыщенный воздух двух состояний 4 и 5 (рис. 3) образует смесь, характеризуемую точкой, расположенной на Id-диаграмме ниже линии $\phi = 1$ (точка 6). Это значит, что в процессе смешивания происходит частичная конденсация пара, сопровождаемая образованием тумана. Действительное состояние смеси (после удаления из воздуха конденсата) будет соответствовать точке 7, расположенной на пересечении линии $\phi = 1$ и прямой $I = \text{const}$, проходящей через точку 6.

Задача 5

По данным табл. 5 найти на Id-диаграмме точку 0, характеризующую состояние влажного воздуха, определить остальные параметры для нее, построить процесс охлаждения до указанной температуры t_2 . Определить графически параметры охлажденного воздуха (теплосодержание I_2 , влагосодержание d_2 , парциальное давление водяного пара $P_{п2}$, степень насыщения водяного пара ϕ_2 , температуру мокрого термометра $t_{м2}$ и температуру точки росы $t_{р2}$). Если процесс охлаждения сопровождается выпадением конденсата, то определить его количество, приходящееся на 1 кг сухого воздуха.

Таблица 5

№ варианта	Параметры влажного воздуха до охлаждения					Температура после охлаждения
	I_0 , Дж/кг	d_0 , г/кг	t_0 , °C	$P_{п0}$, Па	ϕ_0	t_2 , °C
1	-	-	118	41000	-	45
2	-	290	-	-	0,37	28
3	-	120	-	-	0,28	44
4	-	-	-	28000	0,35	36
5	-	-	122	25000	-	43
6	-	-	-	29000	0,35	36
7	-	-	102	-	0,25	49
8	-	-	95	-	0,35	80
9	-	-	-	35000	0,30	32
10	-	-	116	-	0,15	71
11	-	-	120	42000	-	50
12	-	320	-	-	0,30	35
13	-	210	-	-	0,35	25
14	-	-	-	27000	0,40	60
15	-	-	108	-	0,15	72
16	-	-	100	-	0,10	31
17	-	-	120	30000	-	38
18	-	390	-	-	0,20	43
19	-	100	-	-	0,25	50
20	-	35	118	-	-	32
21	720	-	114	-	-	44
22	-	-	100	-	0,30	78
23	-	-	114	-	0,20	90
24	700	-	115	-	-	47
25	-	35	120	-	-	80
26	-	100	-	-	0,20	55
27	-	-	-	29000	0,20	78
28	1200	-	100	-	-	90
29	-	30	125	-	-	44
30	-	-	101	-	0,12	81

Задача 6

По исходным данным одного из вариантов табл. 6 дать характеристику влажного воздуха, полученного в результате смешения воздуха трех компонентов (найти теплосодержание I , влагосодержание d , температуры по сухому и мокрому термометрам t_c , t_m , температуру точки росы t_p , парциальное давление водяного пара P_n и степень насыщения водяного пара ϕ). По условиям задачи построить графики процессов смешения на Id - диаграмме.

Таблица 6

№ варианта	Параметры первого компонента		Параметры второго компонента		Параметры третьего компонента		Количество смешивающихся компонентов, кг		
	I_1 , кДж/кг	t_{c1} , °C	t_{c2} , °C	t_{m2} , °C	d_3 , г/кг	t_{c3} , °C	G_1	G_2	G_3
1	220	50	110	60	350	100	12	4	1
2	1000	80	50	40	200	120	14	3	1
3	700	96	70	46	400	80	11	4	1
4	260	52	108	68	410	124	1	4	8
5	310	61	52	30	420	80	16	8	1
6	420	60	72	28	430	122	1	3	12
7	320	100	106	70	440	82	8	4	1
8	240	110	54	28	450	100	4	8	1
9	430	82	74	70	460	84	1	3	9
10	330	72	104	72	470	108	14	7	1
11	250	54	76	70	480	86	1	3	5
12	380	99	56	56	490	116	15	3	1
13	440	120	102	74	500	84	2	6	9
14	260	108	78	70	390	105	7	1	3
15	350	79	58	28	395	82	4	3	9
16	450	70	100	68	380	110	10	4	1
17	270	118	68	60	385	80	11	3	1
18	390	100	48	26	370	114	1	4	9
19	460	80	98	66	375	78	7	3	1
20	360	66	70	60	360	112	1	7	15
21	280	101	100	64	365	76	3	6	1
22	230	51	120	69	500	80	4	10	1
23	280	122	90	69	490	82	3	1	6
24	235	52	119	68	480	84	10	1	4
25	275	120	91	68	470	86	1	3	6
26	315	58	118	67	460	88	4	3	1
27	270	118	92	67	450	87	1	3	4
28	265	61	117	66	440	85	1	4	3
29	260	116	93	66	430	83	4	10	2
30	255	114	116	65	420	84	7	2	1

Задача 7

По известным данным одного из вариантов задач табл. 7 определить параметры влажного воздуха (теплосодержание I , влагосодержание d , температуры по сухому и мокрому термометрам t_c , t_m , температуру точки росы t_p , парциальное давление водяного пара P_p и степень насыщения водяного пара ϕ), полученного в результате смешения двух компонентов, если известно, что этот воздух участвовал в дальнейшем процессе, указанном в каждом варианте задачи.

Таблица 7

№ варианта	Параметры первого компонента		Параметры второго компонента		Процесс, в котором участвует смесь двух компонентов	Параметры смеси после процесса	
	d_1 , г/кг	t_{c1} , °C	t_{c2} , °C	t_{m2} , °C		t_{c4} , °C	ϕ_4
1	122	100	100	74	охлаждение	80	0,50
2	130	98	120	73	испарение	70	0,60
3	135	99	112	72	испарение	74	0,70
4	140	97	115	74	охлаждение	68	0,80
5	150	96	119	73	испарение	72	0,90
6	145	95	117	72	охлаждение	80	0,55
7	155	94	116	70	испарение	80	0,60
8	160	93	114	69	охлаждение	78	0,60
9	50	42	80	74	нагревание	110	0,15
10	45	44	82	72	нагревание	108	0,14
11	55	50	81	71	нагревание	110	0,16
12	40	40	84	70	нагревание	100	0,20
13	60	55	83	71	нагревание	98	0,21
14	35	40	86	74	нагревание	99	0,22
15	65	54	85	73	нагревание	97	0,21
16	30	35	88	72	нагревание	90	0,30
17	70	52	87	71	нагревание	92	0,28
18	25	40	120	72	охлаждение	72	0,70
19	75	56	82	69	нагревание	110	0,16
20	20	30	118	72	испарение	72	0,75
21	80	54	117	71	испарение	71	0,70
22	15	28	116	70	охлаждение	80	0,60
23	85	56	115	80	испарение	69	0,70
24	10	30	114	70	охлаждение	70	0,70
25	90	60	113	72	испарение	71	0,90
26	80	50	112	74	охлаждение	75	0,80
27	95	55	110	70	охлаждение	70	0,70
28	50	45	108	68	испарение	65	0,65
29	100	70	104	64	испарение	75	0,70
30	110	65	100	82	испарение	80	0,60

3. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ СУШИЛЬНОГО АГЕНТА В КОНВЕКТИВНЫХ СУШИЛКАХ

Газообразный сушильный агент в процессе сушки древесины претерпевает ряд изменений своего состояния. Характер этих изменений зависит от принципиальной схемы сушилки, которая, в свою очередь, определяется видом сушильного агента и кратностью его циркуляции. С учетом этих признаков различают воздушные и газовые сушилки с однократной циркуляцией сушильного агента, воздушные и газовые сушилки с многократной циркуляцией, паровые сушилки.

Принципиальные схемы воздушных сушилок представлены на рис. 4.

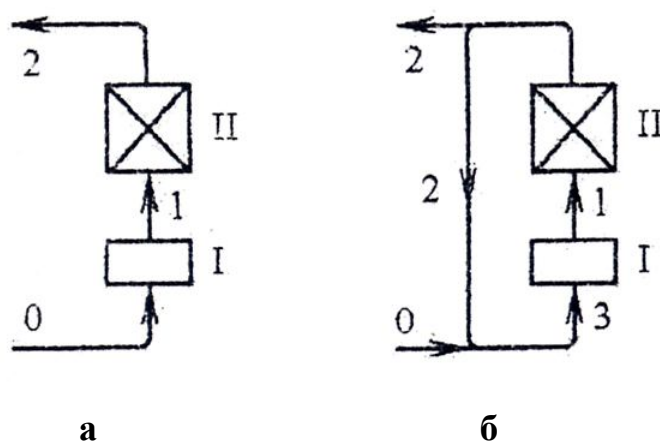


Рис. 4. Принципиальные схемы воздушных сушилок с однократной (а) и многократной (б) циркуляцией сушильного агента.
I – калорифер; II – высушиваемый материал.

Наиболее простой является схема воздушной сушилки с **однократной циркуляцией** (рис. 4 а). Согласно этой схеме, атмосферный воздух состояния 0 поступает в калорифер. Здесь он нагревается, приобретая состояние 1. Нагретый воздух вступает в контакт с высушиваемым материалом и, испаряя из него влагу, вновь изменяет свои параметры. Отработавший воздух в состоянии 2 полностью удаляется в атмосферу.

Принципиальная схема воздушной сушилки с **многократной циркуляцией** отличается от уже рассмотренной тем, что отработавший сушильный агент в состоянии 2 удаляется в атмосферу лишь частично. Большая его часть возвращается на повторное использование и перед поступлением в калорифер смешивается со свежим воздухом состояния 0, подаваемым в сушилку. Образующаяся смесь, характеризующаяся состоянием 3, поступает в калорифер, где за счет нагревания достигает состояния 1. Далее следует сушка, сопровождающаяся изменением параметров воздуха до состояния 2.

Изображение процессов изменения состояния воздуха в описанных сушилках на Id-диаграмме показано на рис. 5.

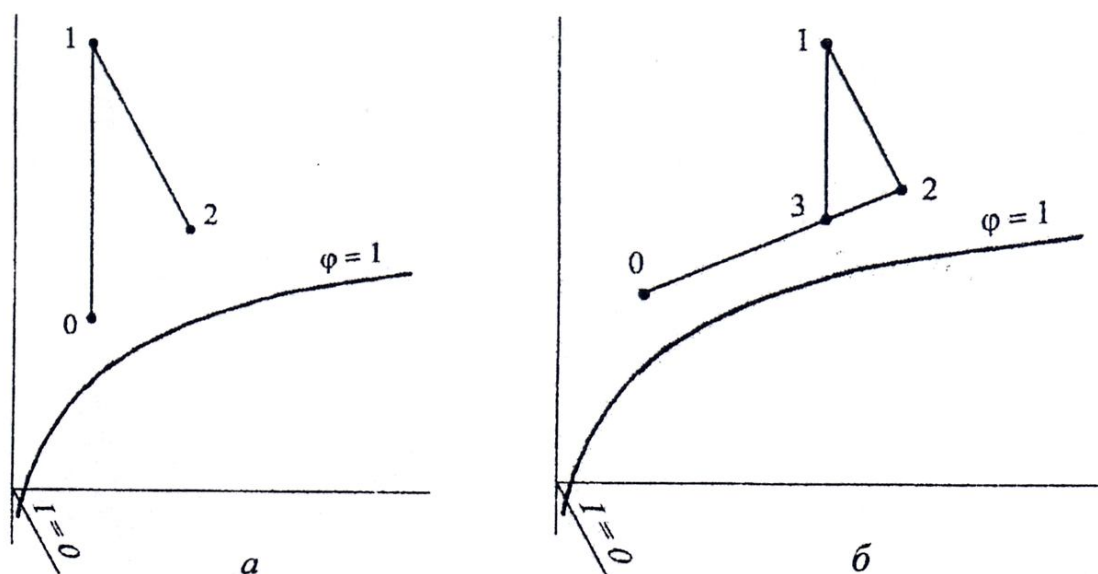


Рис. 5. Изображение на Id-диаграмме процессов изменения состояния воздуха в сушилках с однократной (а) и с многократной (б) циркуляцией агента сушки

В сушилке с однократной циркуляцией (рис. 5, а) процесс нагревания атмосферного воздуха в калорифере изображается отрезком 0-1, расположенным на линии $d = \text{const}$. При сушке, то есть при испарении влаги из материала, состояние воздуха изменяется по $I = \text{const}$ (линии постоянной энтальпии) 1-2.

Изменение состояния воздуха в сушилке с многократной циркуляцией показано на рис. 5, б. Смешивание атмосферного воздуха (состояние 0) и отработавшего сушильного агента (состояние 2) с получением смеси, характеризуемой состоянием 3, отображается отрезком 0-3-2. Процессы нагревания воздуха в калорифере (3-1) и испарения влаги из материала (1-2) изображаются так же, как и в сушилке с однократной циркуляцией: по линиям $d = \text{const}$ и $I = \text{const}$ соответственно.

По изменению состояния сушильного агента во время сушки могут быть определены затраты тепловой энергии на испарение влаги. Расход теплоты на испарение 1 кг влаги, то есть удельный расход теплоты для воздушных сушилок, $q_{\text{исп}}$, кДж/кг, определяется по формуле

$$q_{\text{исп}} = 1000 \frac{I_2 - I_0}{d_2 - d_0}, \quad (11)$$

где I_2 и d_2 – энтальпия и влагосодержание отработавшего воздуха, кДж/кг и г/кг соответственно;

I_0 и d_0 – энтальпия и влагосодержание атмосферного воздуха, кДж/кг и г/кг соответственно.

Удельный расход теплоты на испарение влаги легко определить графически с помощью Id-диаграммы. Для этого из начала координат диаграммы проводят луч, параллельный линии, проходящей через точки 0 и 2, соответствующие состояниям атмосферного и отработавшего воздуха. Удельный расход теплоты читается на угловой шкале, нанесенной на полях Id-диаграммы.

Расход свежего воздуха, приходящегося на 1 кг испаряемой влаги L_0 , кг/кг может быть определен из выражения

$$L_0 = \frac{1000}{d_2 - d_0}, \quad (12)$$

где d_2 – влагосодержание агента сушки на выходе из штабеля, г/кг;

d_0 – влагосодержание свежего воздуха, г/кг.

Количество агента сушки, необходимого для испарения 1 кг влаги из материала L_1 , кг/кг, в камере с многократной циркуляцией определяется из отношения

$$L_1 = \frac{1000}{d_2 - d_3}, \quad (13)$$

где d_2 – влагосодержание агента сушки на выходе из штабеля, г/кг;

d_3 – влагосодержание агента сушки на входе в штабель, г/кг.

Задача 8

Определить L_0 расход свежего воздуха и $q_{\text{исп}}$ тепла на 1 кг испаряемой влаги в сушильной установке с однократной циркуляцией агента сушки по материалу, если известны параметры свежего воздуха, агента сушки и отработавшего агента сушки (табл. 8). Построить графики процессов сушильного цикла на Id-диаграмме.

Таблица 8

№ варианта	Параметры свежего воздуха		Температура агента сушки	Параметр отработавшего агента сушки
	$t_0, ^\circ\text{C}$	φ_0	$t_1, ^\circ\text{C}$	φ_2
1	51	0,15	101	0,96
2	54	0,20	104	0,95
3	56	0,35	109	0,80

Окончание табл. 8

№ варианта	Параметры свежего воздуха		Температура агента сушки	Параметр отработавшего агента сушки
	$t_0, ^\circ\text{C}$	φ_0	$t_1, ^\circ\text{C}$	φ_2
4	55	0,40	115	0,85
5	57	0,55	114	0,70
6	58	0,60	108	0,75
7	59	0,75	120	0,60
8	60	0,80	120	0,65
9	56	0,95	119	0,70
10	55	0,80	114	0,75
11	54	0,70	117	0,80
12	53	0,90	98	0,85
13	52	0,85	109	0,90
14	62	0,50	113	0,95
15	64	0,55	114	1,00
16	65	0,20	113	0,80
17	66	0,25	112	0,85
18	64	0,30	111	0,90
19	63	0,35	110	0,95
20	62	0,40	119	0,85
21	61	0,45	118	1,00
22	60	0,20	120	0,95
23	59	0,25	121	0,90
24	58	0,30	122	0,85
25	57	0,35	123	0,80

Задача 9

Определить расходы свежего воздуха L_0 , агента сушки L_1 , циркулирующего по материалу и тепла на 1 кг испаряемой влаги $q_{\text{исп}}$ в сушильной установке с многократной циркуляцией, если известны параметры свежего воздуха, агента сушки и отработавшего агента сушки (табл. 9). Построить графики процессов сушильного цикла на Id-диаграмме.

Таблица 9

№ варианта	Параметры свежего воздуха		Параметры свежего воздуха			Параметры отработавшего агента сушки	
	$t_0, ^\circ\text{C}$	φ_0	$t_1, ^\circ\text{C}$	φ_1	$d_1, \text{г/кг}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	φ_2
1	51	0,15	90	-	250	-	0,95
2	54	0,20	95	-	-	76	0,90

№ варианта	Параметры свежего воздуха		Параметры свежего воздуха			Параметры отработавшего агента сушки	
	$t_0, ^\circ\text{C}$	φ_0	$t_1, ^\circ\text{C}$	φ_1	$d_1, \text{г/кг}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	φ_2
3	56	0,35	106	-	240	-	0,95
4	55	0,40	107	0,3	-	-	0,90
5	57	0,55	115	-	260	-	0,95
6	58	0,60	110	0,32	-	-	0,90
7	59	0,75	95	-	390	-	0,95
8	60	0,80	100	-	-	68	0,90
9	56	0,95	112	-	240	-	0,95
10	55	0,80	108	0,20	-	-	0,85
11	54	0,70	100	-	260	-	0,95
12	53	0,90	118	-	-	81	0,80
13	52	0,85	95	-	250	-	0,90
14	62	0,50	116	-	230	-	0,95
15	64	0,55	109	0,19	-	-	0,85
16	65	0,20	95	-	340	-	0,95
17	66	0,25	105	0,25	-	-	0,90
18	64	0,30	102	-	300	-	0,95
19	63	0,35	99	0,3	-	-	0,85
20	62	0,40	104	-	270	-	0,90
21	61	0,45	112	0,18	-	-	0,95
22	60	0,20	104	-	290	-	0,90
23	59	0,25	106	-	320	-	0,85
24	58	0,30	103	-	-	73	0,90
25	57	0,35	98	0,30	-	-	0,95

4. СВОЙСТВА ДРЕВЕСИНЫ

В реальных условиях в древесине всегда присутствует влага. Для количественной оценки содержания воды в древесине используют параметр, называемый влажностью. **Влажность** – это отношение массы воды, содержащейся в древесине, к массе абсолютно сухой или влажной древесины, выраженное в процентах. В первом случае влажность называется абсолютной, во втором – относительной.

В технологии деревообработки принято пользоваться абсолютной влажностью. Поэтому в дальнейшем под термином «влажность» мы будем подразумевать именно ее.

$$W_{абс} = W = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100, \quad (14)$$

где m – масса сырой (влажной) древесины, кг;

m_0 – масса абсолютно сухой древесины, кг.

Вода, содержащаяся в древесине, подразделяется на связанную и свободную. Свободная вода находится в полостях клеток, в сосудах и в межклеточных пространствах, а связанная – в стенках клеток.

Содержание в древесине связанной воды не может превышать некоторого максимума, который называется пределом насыщения клеточных стенок. Величина предела насыщения клеточных стенок зависит от породы древесины, однако различие невелико, поэтому с достаточной для практических расчетов точностью можно принять $W_{пн} = 30 \%$.

Древесина является гигроскопическим материалом. Это означает, что она способна изменять свою влажность в зависимости от температуры и влажности окружающего воздуха.

Влажность, к которой стремится древесина при высыхании или увлажнении в воздухе называется **равновесной влажностью**. Величина равновесной влажности зависит от температуры и влажности окружающего воздуха и может быть определена по диаграмме равновесной влажности (см. прил.).

В условиях переменной температуры и влажности древесина изменяет свои размеры. Температурные деформации у нее сравнительно невелики, в значительно большей степени древесина изменяет свои размеры при колебаниях влажности. Уменьшение линейных размеров и объема древесины, происходящее при снижении влажности, называется **усушкой**. Обратный процесс увеличения размеров и объема при увлажнении древесины называется **разбуханием**. Следует отметить, что усушка и разбухание имеют место только в том случае, когда в древесине происходит изменение содержания связанной воды. Наличие или отсутствие свободной воды на размерах древесины не сказывается. Усушка и разбухание – процессы обратимые. При повышении или понижении влажности в диапазоне от 0 до $W_{пн}$ изменения размеров древесины одинаковы.

Величина усушки зависит от трех основных факторов:

- структурного направления измеряемого линейного размера;
- величины и диапазона изменения влажности;
- породы древесины.

Влияние на усушку структурного направления линейного размера обусловлено анизотропными свойствами древесины. Наибольшая линейная усушка наблюдается в тангенциальном направлении. В радиальном направлении она в 1,5-2,0 раза меньше. В направлении вдоль волокон усушка незначительна и обычно в расчетах не учитывается.

Влияние на усушку (U , %) влажности древесины в диапазоне от предела насыщения клеточных стенок до нуля описывается уравнением

$$U = k_y (W_{nn} - W), \quad (15)$$

где k_y – коэффициент усушки, характеризующий ее величину при изменении влажности на 1 %;

W_{nn} – влажность предела насыщения клеточных стенок, %;

W – влажность древесины, %.

Если начальная влажность древесины меньше предела насыщения клеточных стенок, то формула для расчета усушки принимает несколько другой вид

$$U = k_y (W_n - W), \quad (16)$$

где W_n – начальная влажность древесины, %.

Различные породы древесины имеют неодинаковую способность изменять свои размеры и объем с изменением влажности, то есть у них различный коэффициент усушки. Коэффициенты усушки k_y и разбухания k_p древесины в зависимости от структурного направления волокон приведены в табл. приложения.

Для большинства пород коэффициент усушки является функцией параметра, который называется базисной плотностью. **Базисная плотность** – это отношение массы сухого древесинного вещества к объему, занимаемому сырой древесиной. Значения базисной плотности некоторых пород древесины приведены в табл. приложения.

Для решения ряда практических и теоретических задач необходимо знать плотность древесины определенной влажности, которая может быть определена при помощи кривых плотности древесины в зависимости от фактической влажности и базисной плотности древесины. Диаграмма плотности древесины представлена в приложении.

Задача 10

В сушильную камеру загружают E м³ пиломатериалов заданной в табл. 10 породы влажностью W_1 , где они высушиваются до влажности W_2 . Определить массу пиломатериалов M , кг, до и после сушки и количество влаги m , кг, испарившейся из E м³ пиломатериалов в процессе сушки.

Таблица 10

№ варианта	Порода древесины	E , м ³	W_1 , %	W_2 , %
1	Сосна	20	80	8
2	Береза	19	85	10
3	Лиственница	18	75	12
4	Дуб	17	70	18
5	Осина	16	60	20
6	Сосна	15	65	10
7	Бук	14	55	8
8	Липа	13	50	10
9	Ель	12	83	12
10	Кедр	11	85	18
11	Пихта	10	80	20
12	Лиственница	10,5	74	12
13	Дуб	11	80	10
14	Осина	20	85	8
15	Бук	16	75	10
16	Липа	15	70	8
17	Ель	14	60	10
18	Сосна	13	65	12
19	Лиственница	12	55	18
20	Береза	11	50	20
21	Осина	20	83	10
22	Тополь	19	85	8
23	Бук	18	80	10
24	Дуб	17	74	12
25	Ясень	16	58	18
26	Сосна	15	74	20
27	Береза	14	67	12
28	Лиственница	10	77	10
29	Дуб	9	89	8
30	Осина	6	80	10

Задача 11

Обрезная доска заданной породы и распиловки при начальной влажности W_n имеет поперечное сечение $S \times b$. Определить толщину и ширину этой же доски, высушенной до влажности W_k .

Таблица 11

№ варианта	Порода древесины	Характер распиловки	Толщина доски, S, мм	Ширина доски, b, мм	W_n , %	W_k , %
1	Сосна	Радиальная	32	125	65	8
2	Береза	Тангенциальная	40	130	55	10
3	Лиственница	Радиальная	50	150	50	8
4	Дуб	Радиальная	60	150	83	10
5	Осина	Радиальная	25	130	85	12
6	Сосна	Тангенциальная	25	150	80	18
7	Бук	Радиальная	32	200	74	20
8	Липа	Тангенциальная	40	130	80	10
9	Ель	Радиальная	50	150	50	8
10	Кедр	Радиальная	60	125	45	10
11	Пихта	Тангенциальная	25	200	50	12
12	Лиственница	Радиальная	25	125	65	18
13	Дуб	Радиальная	32	150	60	20
14	Осина	Тангенциальная	32	130	65	12
15	Бук	Тангенциальная	40	130	55	10
16	Липа	Радиальная	50	150	50	8
17	Ель	Тангенциальная	60	125	83	10
18	Сосна	Радиальная	25	200	85	8
19	Лиственница	Радиальная	25	200	80	10
20	Береза	Радиальная	32	150	74	12
21	Осина	Тангенциальная	40	130	80	18
22	Тополь	Радиальная	50	130	50	20
23	Бук	Тангенциальная	60	150	45	10
24	Дуб	Радиальная	40	200	50	8
25	Ясень	Радиальная	25	130	65	10
26	Сосна	Тангенциальная	25	150	60	12
27	Береза	Радиальная	32	130	50	18
28	Лиственница	Радиальная	40	125	45	8
29	Дуб	Тангенциальная	50	130	50	10
30	Осина	Тангенциальная	60	150	65	12

Приложение 1

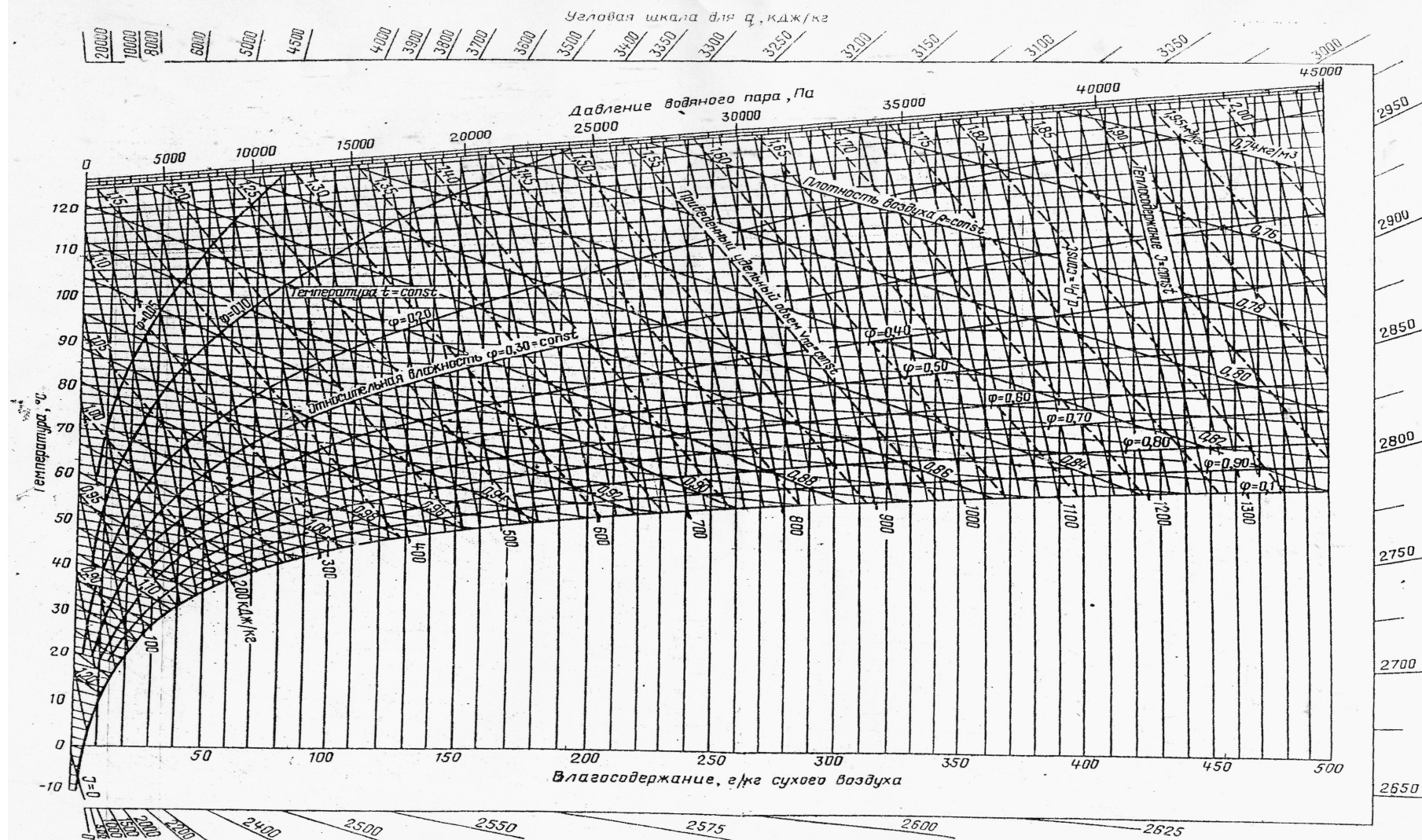
Таблица I

Зависимость давления насыщения водяного пара от температуры

Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, Р _н , Па	Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, Р _н , Па	Темпе- ратура, °C	Давление насыщения, Р _н , Па
1	2	3	4	5	6
0	610,8	32	4753,6	64	23910,0
1	656,6	33	5029,0	65	25008,0
2	705,4	34	5318,2	66	26148,0
3	757,5	35	5621,7	67	27332,0
4	812,9	36	5940,1	68	28561,0
5	871,8	37	6274,0	69	29837,0
6	934,6	38	6624,0	70	31161,0
7	1001,2	39	6990,7	71	32533,0
8	1072,1	40	7374,9	72	33957,0
9	1147,3	41	7777,2	73	35433,0
10	1227,1	42	8198,3	74	36963,0
11	1311,8	43	8639,0	75	38548,0
12	1401,5	44	9099,8	76	40190,0
13	1496,7	45	9581,7	77	41890,0
14	1597,4	46	10085,4	78	43650,0
15	1704,1	47	10612,0	79	45473,0
16	1817,0	48	11161,0	80	47359,0
17	1936,4	49	11735,0	81	49310,0
18	2962,6	50	12335,0	82	51328,0
19	2196,0	51	12960,0	83	53415,0
20	2336,8	52	13612,0	84	55572,0
21	2485,5	53	14292,0	85	57802,0
22	2642,4	54	15001,0	86	60107,0
23	2807,9	55	15740,0	87	62488,0
24	2982,4	56	16510,0	88	64947,0
25	3166,3	57	17312,0	89	67486,0
26	3360,0	58	18146,0	90	70108,0
27	3563,9	59	19015,0	91	72814,0
28	3778,5	60	19919,0	92	75607,0
29	4004,3	61	20859,0	93	78488,0
30	4241,7	62	21837,0	94	81460,0
31	4491,3	63	22854,0	95	84525,0

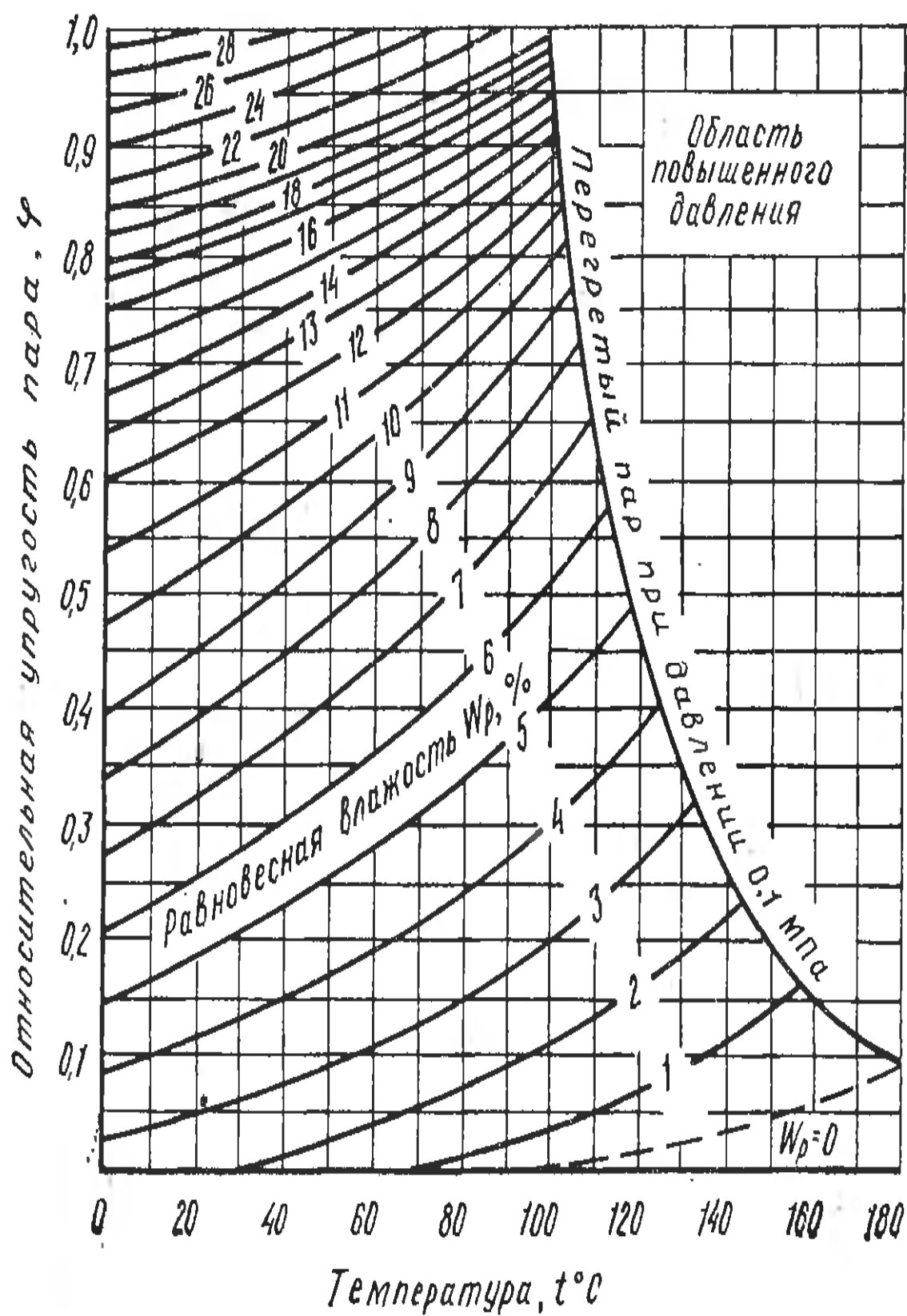
Окончание табл. I

1	2	3	4	5	6
96	87658,0	126	232090,0	156	543310,0
97	90943,0	127	239320,0	157	557640,0
98	94301,0	128	246740,0	158	572280,0
99	97760,0	129	254340,0	159	587220,0
100	101325,0	130	262130,0	160	602480,0
101	101325,0	131	270120,0	161	618040,0
102	104996,0	132	278300,0	162	633930,0
103	108776,0	133	186680,0	163	650140,0
104	112668,0	134	295270,0	164	666680,0
105	116675,0	135	304060,0	165	683550,0
106	120799,0	136	313060,0	166	700750,0
107	125042,0	137	322270,0	167	718300,0
108	129408,0	138	331710,0	168	736200,0
109	133898,0	139	341370,0	169	754450,0
110	138515,0	140	35125,0	170	773050,0
111	143260,0	141	361360,0	171	792020,0
112	148140,0	142	371700,0	172	811360,0
113	153160,0	143	382280,0	173	831060,0
114	158320,0	144	393110,0	174	851140,0
115	163610,0	145	404180,0	175	871610,0
116	169050,0	146	415500,0	176	892460,0
117	174640,0	147	427070,0	177	913700,0
118	180380,0	148	438900,0	178	935340,0
119	186280,0	149	450990,0	179	957390,0
120	192330,0	150	463340,0	180	979840,0
121	198540,0	151	475970,0	181	1002700,0
122	204910,0	152	488870,0		
123	211450,0	153	502050,0		
124	218150,0	154	515520,0		
125	225030,0	155	529260,0		



Id – диаграмма влажного воздуха

Диаграмма равновесной влажности



Приложение 4

Таблица II

Коэффициенты усушки и разбухания древесины

Порода	Коэффициент усушки k_y и разбухания k_p , % влажности					
	По объему		По радиальному направлению		По тангенциальному направлению	
	k_y	k_p	k_y	k_p	k_y	k_p
Лиственница	0,52	0,61	0,19	0,20	0,35	0,39
Сосна	0,44	0,51	0,17	0,18	0,28	0,31
Ель	0,43	0,50	0,16	0,17	0,28	0,31
Пихта	0,39	0,44	0,11	0,11	0,28	0,31
Кедр	0,37	0,42	0,12	0,12	0,26	0,28
Береза	0,54	0,64	0,26	0,28	0,31	0,34
Бук	0,47	0,55	0,17	0,18	0,32	0,35
Ясень	0,45	0,52	0,18	0,19	0,28	0,31
Дуб	0,43	0,50	0,18	0,19	0,27	0,29
Осина	0,41	0,47	0,14	0,15	0,28	0,30

Приложение 5

Таблица III

Значения базисной плотности древесины некоторых пород

Порода древесины	Базисная плотность, ρ_b , кг/м ³
Береза	500
Бук	530
Вяз	520
Граб	630
Дуб	550
Ель	360
Кедр	350
Клен	550
Липа	400
Лиственница	520
Ольха	420
Осина	400
Пихта	300
Сосна	400
Тополь	400
Ясень	360